

УСТОЙЧИВОСТЬ НАГРЕТОГО КОЛЬЦА В ЖЕСТКОЙ ОБОЙМЕ**А.В. Егоров¹**

antegor177@mail.ru

В.Н. Егоров²¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация² ОАО НИАТ, Москва, Российская Федерация**Аннотация**

Задачу расчета на устойчивость металлических колец, ограниченных внешней жесткой средой и сжимаемых прессовым давлением, предложено решать как контактную задачу деформирования составного твердого тела с односторонней связью. В основу данного метода положены: технологические отклонения, свойственные реальным конструкциям, пространственное напряженно-деформированное состояние, режим реального времени. По изменению напряженно-деформированного состояния кольца визуально и количественно определен момент локальной потери устойчивости кольца. Метод реализован в программном комплексе LS-DYNA в динамической постановке с применением объемных конечных элементов. Для учета больших перемещений и пластических деформаций кольца расчеты выполнены в геометрически и физически нелинейной постановке. Внешнее прессовое нагружение кольца задано его нагревом внутри жесткой ограничивающей среды (обоймы), которая считается теплоизолированной. Задача теплопроводности не решается. Проведены расчеты на устойчивость тонкого стального кольца при двух видах технологических отклонений, связанных с местным изменением толщины кольца и обоймы на разных длинах. Показано соответствующее различие в стадии начального деформирования кольца и последующего формирования выпучины (лепестка). Приведены картины полей деформаций кольца и обоймы, из которых визуально установлен момент потери устойчивости кольца. Построены графики изменения напряжений, деформаций и перемещений в локальной зоне расслоения, по которым количественно найден момент потери устойчивости кольца. Качественная и количественная оценки устойчивости кольца совпали

Ключевые слова

Нагретое стесненное кольцо, устойчивость стесненного кольца, напряженно-деформированное состояние, начальные несовершенства конструкции, конечно-элементное моделирование

Поступила 23.11.2018

© Автор(ы), 2019

Введение. В строительных конструкциях находят применение цилиндрические оболочки, работающие соосно, например в трубопроводных транспортных коммуникациях. Подобные конструктивные элементы используются и в авиационно-космических конструкциях, к которым предъявляются повышенные требования по прочности и массе. Поэтому актуальны задачи по деформированию тонких колец, окруженных жесткой средой (обоймой).

При действии тепловых нагрузок или гидростатического давления тонкостенные кольца могут терять устойчивость, обусловленную выпучиванием внутрь жесткой обоймы, запрещающей кольцу радиальные внешние перемещения. Такие задачи исследовались в работах [1–8], в которых для идеальных (с точки зрения геометрии и механических свойств) колец принимались начальные возмущения в виде местных, заранее оговоренных прогибов заданной формы и амплитуды. Таким образом навязывалось вполне конкретное условное предполагаемое отклонение, и исследовался вопрос его развития с последующей оценкой устойчивости тонкого металлического кольца, окруженного жесткой обоймой. Для анализа применялись аналитические, экспериментальные и численные методы. Обзоры известных публикаций по устойчивости стесненных цилиндрических оболочек и колец содержатся в работах [9–11].

Цель настоящей работы — предложить метод расчета на устойчивость стесненных колец, свободный от предположений по начальной форме отклонений, но определяющий их из решения контактной задачи деформирования составного твердого тела при учете технологических отклонений (по геометрии и механическим свойствам), присущих реальным конструкциям.

В настоящей работе рассматривается тонкое металлическое кольцо, окруженное реальной жесткой обоймой (жестким кольцом). Считается, что обойма имеет идеальную геометрическую форму окружности (круга), но в ней присутствуют технологические отклонения в виде малого местного отклонения толщины в пределах 10 % толщины жесткого кольца, что характерно для реальных конструкций. Местный вырез малого объема в жесткой обойме (жестком кольце) провоцирует начальное деформирование тонкого металлического кольца, которое сначала приобретает местный наружный изгиб (проминается в зазор, обусловленный вырезом в обойме), а затем начинается внутреннее выпучивание. При этом форма и амплитуда выпучивания определяются из решения задачи деформирования металлического кольца, а не задаются изначально.

Нагружение системы кольцо–обойма осуществляется нагревом внутреннего металлического кольца, которое расширяется и создает контактное давление на границе кольцо–наружная жесткая обойма, при этом обойма считается теплоизолированной.

В силу нулевых радиальных перемещений обоймы металлическое кольцо деформируется, возникают местный изгиб и внутреннее выпучивание — местная потеря устойчивости. Отметим, что при идеальных обойме и кольце (без вырезов) последнее не теряет устойчивость: кольцо только расширяется без изменения формы.

Модель деформирования. При построении модели деформирования системы кольцо–обойма применяется подход, включающий в себя технологические отклонения, пространственное напряженно-деформированное состояние, режим текущего (реального) времени. Именно эти факторы дают возможность перевести задачу деформирования металлического кольца в задачу потери устойчивости кольца.

Известно, что все реальные конструкции имеют поля допусков геометрических и механических характеристик, что объясняется технологией изготовления. В системе кольцо–обойма в общем случае технологические отклонения присутствуют в кольце и обойме. В целях конкретизации в настоящей работе рассматриваются только малые геометрические технологические отклонения в кольце и обойме в виде вырезов и выступов. Пусть они имеют форму кольцевого сектора, составляющего по толщине часть полной толщины кольца и обоймы (рис. 1, а). Длина дуги кольцевого сектора может варьироваться. Неглубокий внутренний вырез в обойме позволяет металлическому кольцу с промятием (равенство глубин выреза и выступа) при нагреве (рис. 1, б) деформироваться в его сторону и приобретать местный изгиб, который с течением времени формирует начальную форму выпуклости, переходящую в устойчивую форму. Отметим, что форма выпучины различна для разных технологических отклонений, а вид устойчивой выпучины похож на лепесток. Вырезы и выступы берутся по всей ширине обоймы и кольца.

Ввиду особенностей деформирования кольца в малой зоне в окрестности выреза в обойме требуется более полное пространственное определение напряженно-деформированного состояния кольца, так как здесь зарождается начальная форма прогиба. В силу возможности возникновения пластических деформаций для металлического кольца применяется стандартная упругопластическая диаграмма деформирования материала.

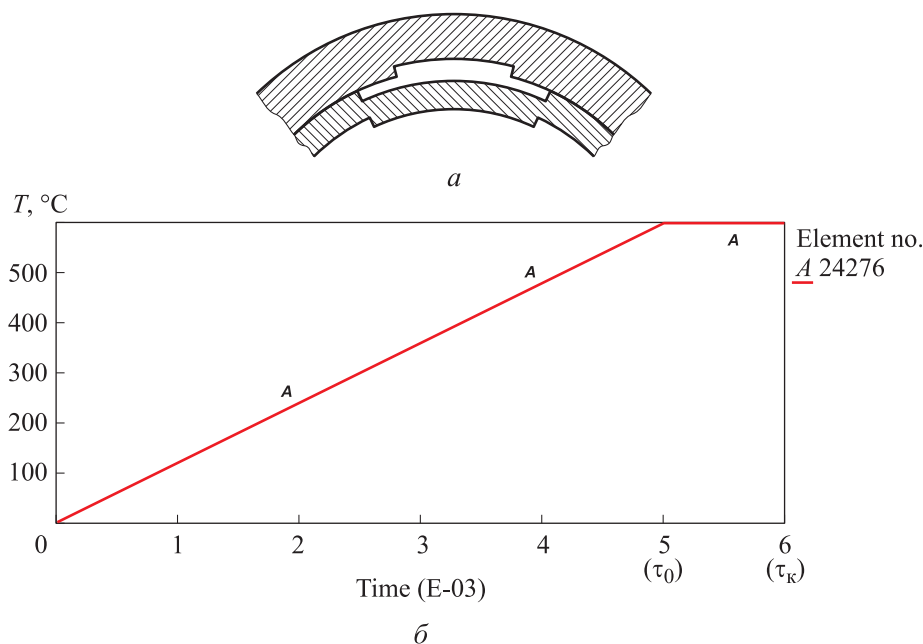


Рис. 1. Расчетная схема системы кольцо–обойма (*a*) и температурное (T , °C) нагружение кольца (*b*) по времени τ

Для того чтобы кольцо могло отслаиваться от обоймы при образовании внутренней выпучины, на поверхности сопряжения кольцо–обойма прием модель одностороннего контакта. Это означает, что радиальные перемещения кольца в сторону обоймы запрещены, а в обратную сторону — разрешены свободно, без силовых нормальных связей. Касательные связи между кольцом и обоймой также отсутствуют.

Граничные условия на поверхностях составного трехмерного тела кольцо+обойма задаются следующим образом. На правом торце запрещены горизонтальные (вдоль оси) перемещения, на левом запрещены горизонтальные смещения кольца и обоймы относительно друг друга. Цилиндрические наружная (обойма) и внутренняя (кольцо) поверхности свободны от закрепления и нагрузок.

В модель деформирования неконсервативной системы кольцо–обойма закладывается способность отслеживания напряженно-деформированного состояния кольца в режиме текущего (реального) времени, так как потеря устойчивости кольца в предлагаемом методе анализа определяется по изменению напряженно-деформированного состояния кольца во времени в процессе деформирования.

Метод расчета. Для расчета на устойчивость равномерно нагретого кольца, окруженного жесткой обоймой, с учетом разработанной модели

деформирования системы кольцо–обойма применим конечно-элементный программный комплекс LS-DYNA в динамической постановке.

Составное тело кольцо+обойма разобьем на объемные конечные элементы типа SOLID, используя радиальные, окружные и поперечные сечения [11]. Радиальная и окружная разбивка дает возможность в удобной форме задавать технологические отклонения в виде тонкого выреза переменной длины в обойме и выреза и выступа в кольце. Поперечная разбивка предназначена для учета переменнойности параметров по ширине обоймы и кольца. В целях снижения размерности задачи поместим технологические отклонения (вырезы и выступы в кольце и обойме) в верхней части двухслойного кольца (кольцо–обойма) и, принимая во внимание симметрию конструкции относительно вертикальной плоскости, рассмотрим только ее половину [11]. Число слоев конечных элементов по толщине обоймы выбираем из условия задания толщины выреза требуемой величины; по кольцу — для исследования неоднородности напряженно-деформированного состояния.

Принятая таким образом разбивка конструкции кольцо–обойма на конечные элементы обеспечивает определение в ней пространственного напряженно-деформированного состояния, что приобретает особую значимость в локальной области конструкции, содержащей технологические отклонения (вырезы и выступы). В этой области кольцо может деформироваться пластически, для чего в методе расчета предусматривается использование реальной диаграммы деформирования материала кольца, перестраиваемой в зоне упрочнения в истинную диаграмму [11]. Пластические свойства материала кольца задаются командой *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY, в которой истинная диаграмма представляется кусочно-линейной функцией с семью участками. Линейно-упругая обойма имеет жесткость на порядок выше, чем у металлического кольца.

Кольцо нагревается во времени с использованием команды *DEFINE_CURVE, согласно которой температура кольца изменяется по кусочно-линейному закону (см. рис. 1, б). В настоящей работе моменты времени: $\tau_0 = 0,005$ с; $\tau_k = 0,01$ с. На первом участке ($0 < \tau < \tau_0$) идет нагрев кольца по линейному закону, на втором участке ($\tau_0 < \tau < \tau_k$) поддерживается постоянная температура T_0 . Нагрев обоймы не происходит, поскольку считается, что между кольцом и обоймой стоит тепловой изолятор и задача теплопроводности не решается. Моменты времени τ_0 и τ_k выбирают из соображения отсутствия возможного теплового удара и

ограничения времени машинного счета. Примем, что механические свойства материалов кольца и обоймы не зависят от температуры.

Таким образом, динамическое поведение конструкции кольцо–обойма определяется принятым законом ее теплового нагружения во времени.

Анализ результатов. Рассмотрим деформирование нагретого тонкого стального кольца, помещенного в жесткую теплоизолированную стальную обойму. Характеристики кольца и обоймы выбраны следующими: $E = 200$ ГПа, $\sigma_B = 550$ МПа, $\sigma_{0,2} = 362$ МПа, $\delta = 16$ % (при разрыве), $\rho = 7600$ кг/м³. Наружный диаметр кольца и обоймы 88 и 100 мм, толщина 0,5 и 6 мм, ширина 14 мм. Жесткость обоймы на порядок больше жесткости кольца. В данном случае $(Eha)_{обоймы} / (Eha)_{кольца} = 12$.

В реальную конструкцию кольцо–обойма введем два варианта геометрических технологических отклонений и сравним конструкции по формам прогибов кольца. В обоих вариантах в обойме существует вырез глубиной 0,5 мм и длиной 9 мм.

В первом варианте в кольце есть вырез глубиной 0,1 мм и длиной 18 мм, во втором варианте — промятие, образованное вырезом и выступом глубиной 0,1 мм и длиной 9 мм. Кольцо нагревается до температуры 600 °С по кусочно-линейному закону (см. рис. 1, б), в котором $\tau_0 = 0,005$ с; $\tau_k = 0,01$ с. Расчеты показывают, что в первом варианте конструкции (рис. 2, а) сначала происходит «двойной» прогиб (рис. 2, б) с четырьмя радиусами кривизны, затем, с ростом температуры, зарождается лепесток с тремя радиусами кривизны (рис. 2, в) — это начало потери устойчивости кольца. При температуре 600 °С амплитуда и кривизна лепестка увеличиваются (рис. 2, г), происходит отслаивание кольца от обоймы.

Во втором варианте конструкции (рис. 3, а) при нагреве кольца сразу формируется лепесток (рис. 3, б), который с повышением температуры растет (рис. 3, в). Длина отслоения меньше, чем в первом варианте, а форма лепестка более заостренная.

Далее исследуем напряженно-деформированное состояние первого варианта конструкции кольцо–обойма. Выделим две зоны: по толщине кольца в вершине лепестка и по длине дуги отслоения кольца от обоймы.

Первая зона — по толщине кольца (рис. 4, в). Расчеты показывают, что вертикальные (рис. 4, а) и полные (рис. 4, б) перемещения элементов А, В, С, D в вершине лепестка практически совпадают. На графиках (см. рис. 4, а, б) есть две особые точки, в которых функции претерпевают разрыв второго рода. При $\tau_1 = 0,002$ с резкий рост перемещений сменяется более плавным, что означает начало потери устойчивости, когда сформи-

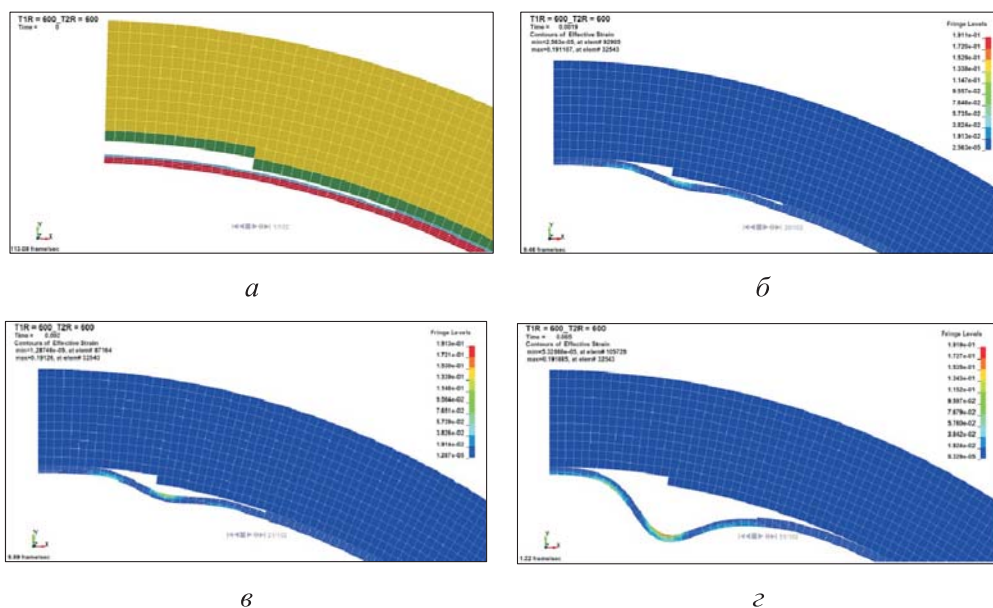


Рис. 2. Поля деформаций в системе кольцо–обойма (а) при первом варианте технологических отклонений в зависимости от времени τ (б–г)

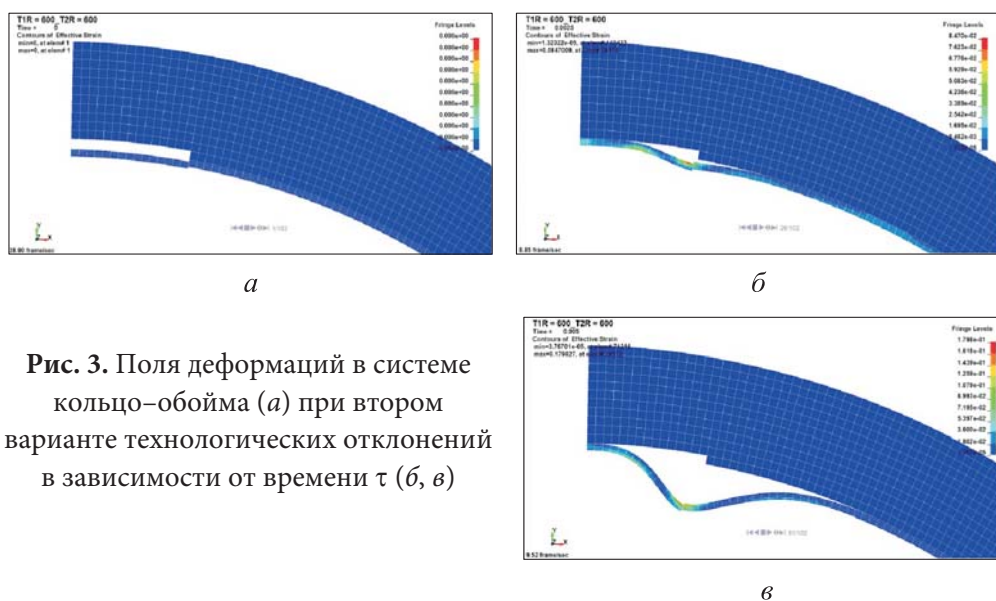


Рис. 3. Поля деформаций в системе кольцо–обойма (а) при втором варианте технологических отклонений в зависимости от времени τ (б, в)

ровался лепесток. При $\tau_2 = 0,005$ с рост лепестка прекращается, так как в этот момент перестает повышаться температура кольца. При вертикальных перемещениях (см. рис. 4, а) по времени при $\tau = 0,0017$ с изменяется их значение с положительного на отрицательное. Это связано с процессом деформирования кольца: сначала кольцо расширяется от нагрева и входит в вырез обоймы, а затем происходит внутреннее выпучивание.

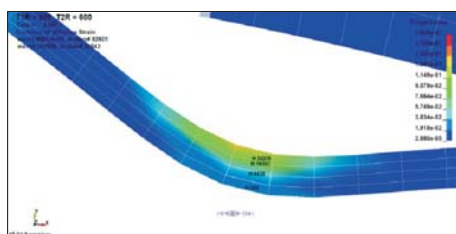
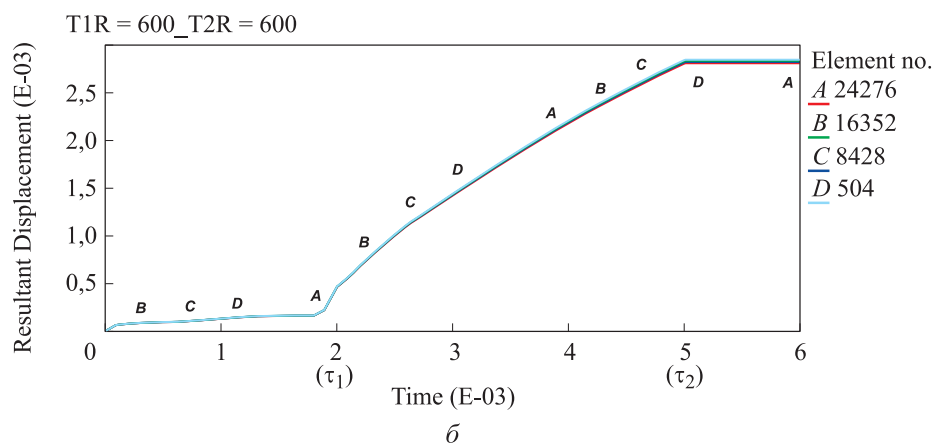
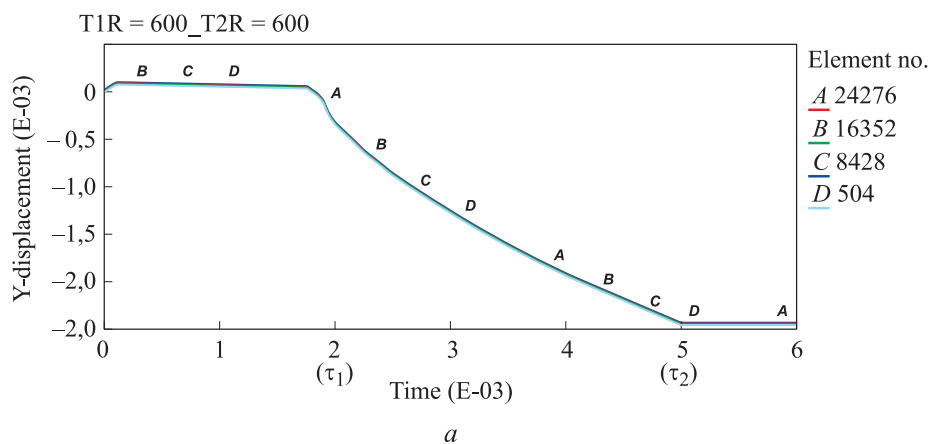


Рис. 4. Изменение во времени вертикальных (*a*) и полных (*б*) перемещений в зоне лепестка (*в*)

Изменения по времени скорости вертикального перемещения элементов *A, B, C, D* (рис. 5, *a*), напряжений Мизеса (рис. 5, *б*), нормальных напряжений по оси *X* (рис. 5, *в*) и остаточных пластических деформаций (рис. 5, *г*) также согласуются со значениями в точках τ_1 и τ_2 . В точке τ_1 на всех функциях наблюдаются разрывы второго рода. В интервале $(\tau_1 - \tau_2)$ функции стремятся к стабилизации, здесь происходит рост лепестка.

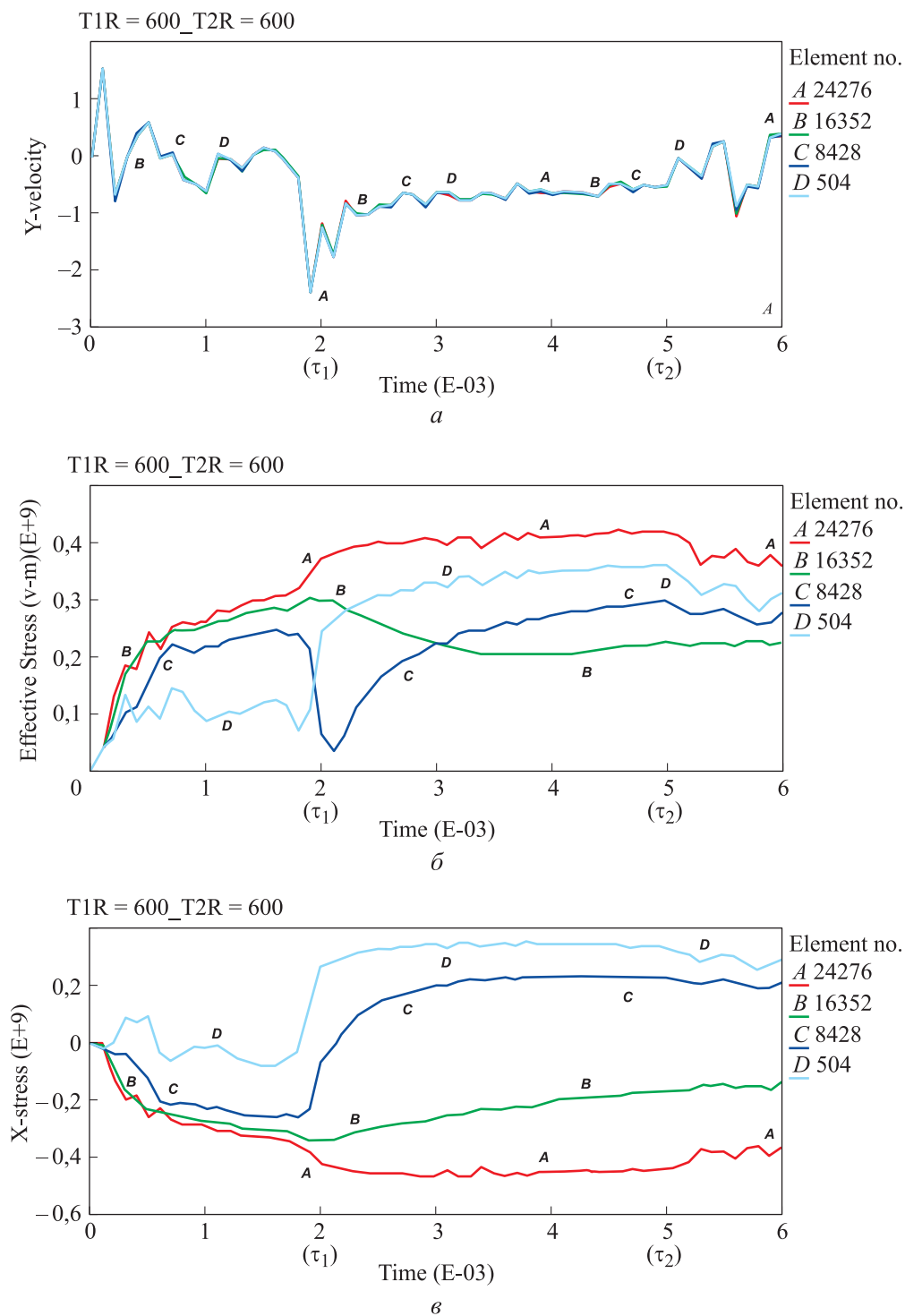


Рис. 5 (начало). Изменение во времени скорости вертикального перемещения (а), напряжений Мизеса (б), нормальных напряжений (в) в зоне лепестка

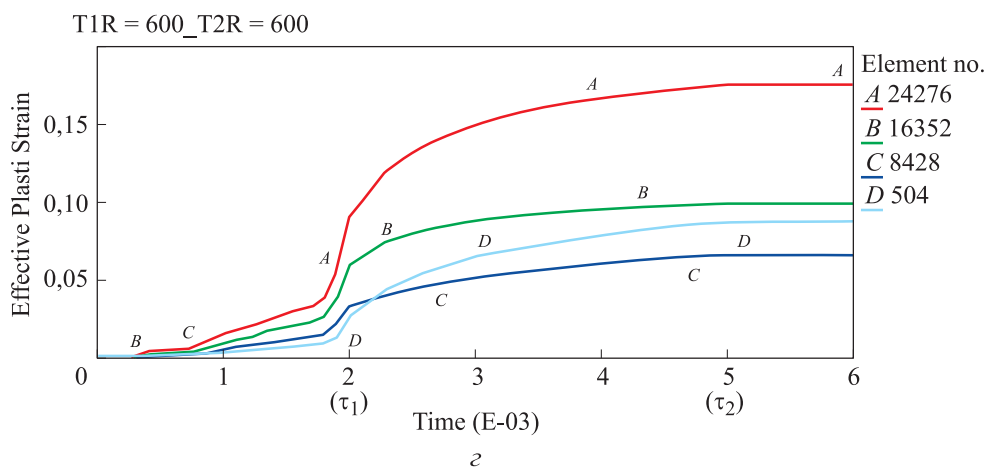


Рис. 5 (окончание). Изменение во времени остаточных пластических деформаций (ε) в зоне лепестка

Развитие деформаций лепестка (см. рис. 5, ε) прекращается в точке τ_2 , когда температура кольца достигает заданного значения 600 °С. Наиболее нагруженными (см. рис. 5, б, в) являются внутренние слои кольца (элементы А и В) в вершине лепестка. Эти слои находятся в зоне сжатия (см. рис. 5, в), тогда как наружные слои (элементы С и D) — в зоне растяжения. Такое напряженное состояние характерно для изгибного нагружения, при этом нейтральная линия сдвинута в сторону наружных слоев кольца.

Вторая зона — по длине отслоения (рис. 6). Проанализируем изменение во времени напряженно-деформированного состояния внутреннего слоя кольца вдоль дуги отслоения кольца от обоймы (см. рис. 6).

Из данных графика полных перемещений (рис. 7, а) следует, что форма лепестка начинает образовываться в момент времени τ_1 , когда начинает проявляться заметное различие в перемещениях элементов вблизи вершин элементов (I, J, K). В момент времени τ_2 заканчивается рост перемещений. Остаточные пластические деформации (рис. 7, б) существенны только в области вершины лепестка, где достигают предельных значений; в остальной части кольца деформации составляют ~ 1 %.

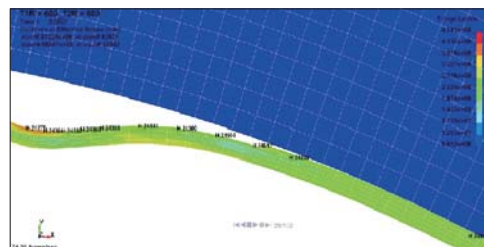


Рис. 6. Дуга отслоения кольца от обоймы

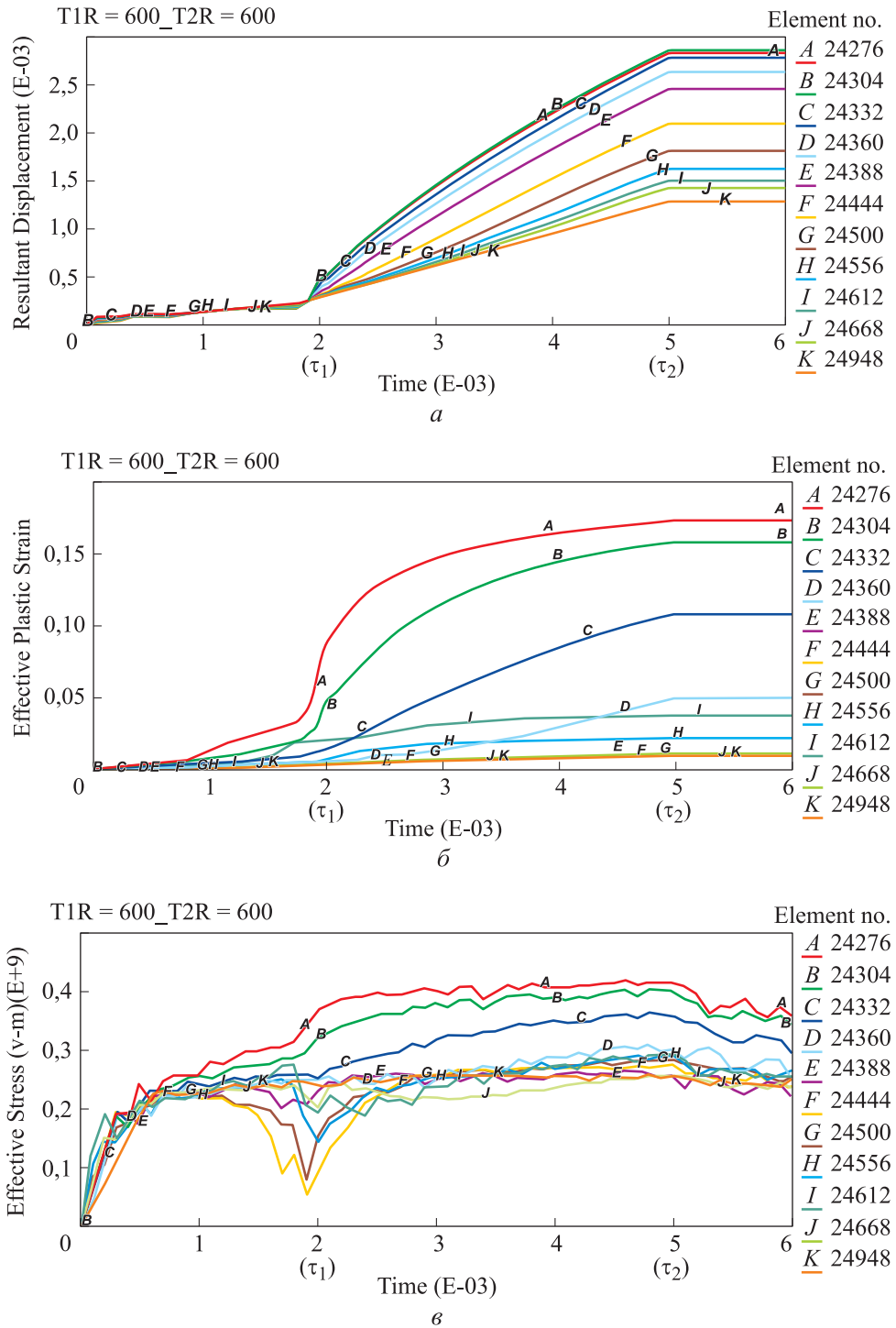


Рис. 7 (начало). Изменение во времени полных перемещений (а), остаточных пластических деформаций (б), полных напряжений (в) в зоне отслоения внутреннего слоя кольца

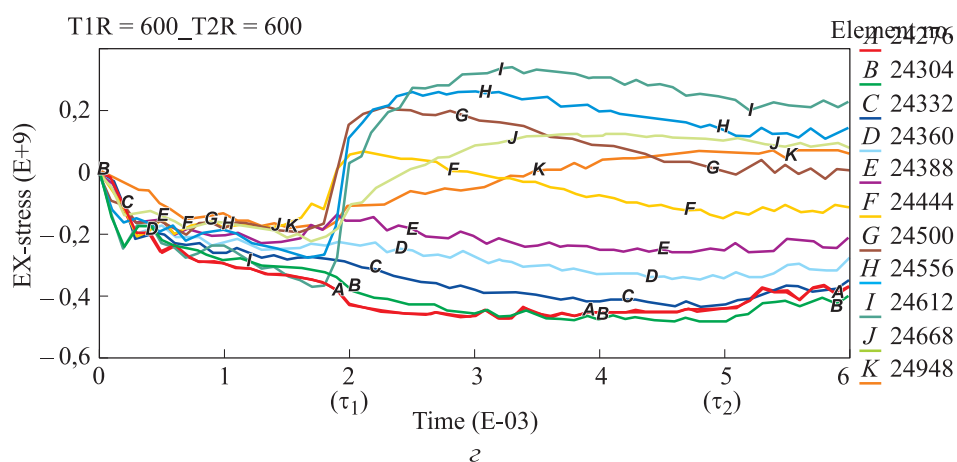


Рис. 7 (окончание). Изменение во времени нормальных напряжений (σ) внутреннего слоя кольца в зоне отслоения

Наибольшие полные напряжения (рис. 7, в) также сосредоточены в зоне вершины лепестка (элементы А, В, С), причем нормальные напряжения по оси Х (рис. 7, з) меняют свой знак в интервале (τ_1, τ_2) , что соответствует кривизнам дуги отслоения кольца от обоймы.

Заключение. Предложенный метод расчета на устойчивость колец, ограниченных жесткой средой (обоймой), свободен от допущения на начальную форму прогиба, что делает его более универсальным, чем известные методы, так как в нем учитываются не только начальные прогибы, но и технологические отклонения, свойственные реальным конструкциям. При таком подходе формирование местного прогиба (лепестка) кольца происходит в процессе решения контактной задачи деформирования двух тел кольцо–обойма с односторонней связью.

В качестве технологических рассмотрены геометрические отклонения, отражающие изменение толщины кольца и обоймы в пределах заданных допусков.

Построена геометрически и физически нелинейная модель деформирования системы кольцо–обойма, что позволило учесть большие перемещения и пластические деформации металлического кольца. Используемый метод расчета с применением объемных конечных элементов в программном комплексе LS-DYNA в динамической постановке ориентирован на учет технологических отклонений, пространственного напряженно-деформированного состояния и режима реального (текущего) времени, что дает возможность свести задачу устойчивости нагретого стесненного кольца к задаче деформирования системы кольцо–обойма.

Исследовано механическое поведение нагретого тонкого стального кольца в жесткой обойме при двух вариантах геометрических технологических отклонений в виде локальных вырезов в обойме и локальных вырезов и выступов в кольце. Сравнение показало различие в формировании начального прогиба (лепестка). Начало потери устойчивости можно определять по полученным в результате численных расчетов текущим (изменяющимся во времени) полям деформаций, а также по графикам зависимости напряжений, деформаций и перемещений от времени, на которых видны характерные изломы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Феодосьев В.И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. М., Наука, 1973.
- [2] Glock D. Überkritisches Verhalten eines Starr Ummantelten Kreisrohres bei Wasserdruck von Aussen und Temperaturerhöhung. *Der Stahlbau*, 1977, bb. 46, N 7, ss. 212–217.
- [3] Sun C., Shaw W.J.D., Vinogradov A.M. Instability of confined rings: an experimental approach. *Exper. Mech.*, 1995, vol. 35, no. 2, pp. 97–103. DOI: 10.1007/BF02326466
- [4] Estrada C.F., Godoy L.A., Flores F.G. Buckling of vertical sandwich cylinders embedded in soil. *Thin Wall. Struct.*, 2012, no. 61, pp. 188–195. DOI: 10.1016/j.tws.2012.05.010
- [5] Vasilikis D., Karamanos S.A. Buckling design of confined steel cylinders under external pressure. *J. Pressure Vessel Technol.*, 2010, vol. 133, no. 1, pp. 331–341. DOI: 10.1115/1.4002540
- [6] Bradford M.A., Roufegarinejad A. Elastic local buckling of thin-walled elliptical tubes containing elastic infill material. *IMMII*, 2007, vol. 1, no. 1, pp. 143–156.
- [7] Silveira R.A.M., Nogueira C.L., Gonzalves P.B. A numerical approach for equilibrium and stability analysis of slender arches and rings under contact constraints. *Int. J. Solids Struct.*, 2013, vol. 50, no. 1, pp. 147–159. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.09.015
- [8] El-Sawy K. Inelastic stability of liners of cylindrical conduits with local imperfection under external pressure. *Tunnel. Undergr. Sp. Tech.*, 2013, no. 33, pp. 98–110. DOI: 10.1016/j.tust.2012.09.004
- [9] Vasilikis D., Karamanos S.A. Mechanics of confined thin-walled cylinders subjected to external pressure. *Appl. Mech. Rev.*, 2014, vol. 66, no. 1, art. 010801. DOI: 10.1115/1.4024165
- [10] Васильев В.В., Мороз Н.Г. Композитные баллоны давления. Проектирование, расчет, изготовление и испытания. М., Машиностроение, Инновационное машиностроение, 2015.
- [11] Егоров А.В. Устойчивость цилиндрических оболочек в жесткой среде. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 9. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-9-1670

Егоров Антон Витальевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Егоров Виталий Николаевич — д-р техн. наук, директор по науке–ученый секретарь ОАО НИАТ (Российская Федерация, 117587, Москва, Кировоградская ул., д. 3).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Егоров А.В., Егоров В.Н. Устойчивость нагретого кольца в жесткой обойме. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 3, с. 62–77.
DOI: 10.18698/0236-3941-2019-3-62-77

BUCKLING OF A HEATED RING ENCLOSED IN A RIGID CASE

A.V. Egorov¹

antegor177@mail.ru

V.N. Egorov²

¹ **Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

² **Joint Stock Company National Institute of Aviation Technologies, Moscow, Russian Federation**

Abstract

We propose to solve the buckling problem for metal rings subjected to compression loading when externally enclosed in a rigid medium as a contact problem of deformation of a composite solid with a unilateral constraint. This method is based on manufacturing deviations characteristic of real structures; general state of stress; real-time operation. With this approach, the method makes it possible to determine the moment of local buckling of the ring visually and quantitatively from the changes in the stress-strain state of the ring. We implemented our method in the LS-DYNA software package in the dynamic formulation using solid finite elements. The geometrically and physically non-linear computation problem statement allows for taking large displacements and plastic strains into account. External compression loading of the ring is stated by its heating inside a rigid enclosing medium (the case), which is considered thermally insulated. We do not solve the heat conduction problem. We computed buckling parameters of a thin steel ring for two manufacturing deviation types relating to local variations of ring and case thicknesses at different

Keywords

Enclosed heated ring, enclosed ring buckling, stress-strain state, initial structural imperfections, finite element analysis

lengths. We show how these two types lead to differences at the initial ring deformation stage and subsequent loop formation (“inward lobe”). We present strain field images for the ring and the case, which made it possible to visually detect the ring buckling moment. We plotted the stress, strain and displacement curves in the local delamination area. These curves enabled us to quantitatively detect the ring buckling moment. Qualitative and quantitative estimates of ring buckling matched

Received 23.11.2018

© Author(s), 2019

REFERENCES


- [1] Feodos'yev V.I. *Izbrannye zadachi i voprosy po soprotivleniyu materialov* [Selected problems on strength of materials]. Moscow, Nauka Publ., 1973.
- [2] Glock D. Überkritisches Verhalten eines Starr Ummantelten Kreisrohres bei Wasserdruck von Aussen und Temperaturerhöhung. *Der Stahlbau*, 1977, bb. 46, N 7, ss. 212–217.
- [3] Sun C., Shaw W.J.D., Vinogradov A.M. Instability of confined rings: an experimental approach. *Exper. Mech.*, 1995, vol. 35, no. 2, pp. 97–103. DOI: 10.1007/BF02326466
- [4] Estrada C.F., Godoy L.A., Flores F.G. Buckling of vertical sandwich cylinders embedded in soil. *Thin Wall. Struct.*, 2012, no. 61, pp. 188–195. DOI: 10.1016/j.tws.2012.05.010
- [5] Vasilikis D., Karamanos S.A. Buckling design of confined steel cylinders under external pressure. *J. Pressure Vessel Technol.*, 2010, vol. 133, no. 1, pp. 331–341. DOI: 10.1115/1.4002540
- [6] Bradford M.A., Roufegarinejad A. Elastic local buckling of thin-walled elliptical tubes containing elastic infill material. *IMMIIJ*, 2007, vol. 1, no. 1, pp. 143–156.
- [7] Silveira R.A.M., Nogueira C.L., Gonzalves P.B. A numerical approach for equilibrium and stability analysis of slender arches and rings under contact constraints. *Int. J. Solids Struct.*, 2013, vol. 50, no. 1, pp. 147–159. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.09.015
- [8] El-Sawy K. Inelastic stability of liners of cylindrical conduits with local imperfection under external pressure. *Tunnel. Undergr. Sp. Tech.*, 2013, no. 33, pp. 98–110. DOI: 10.1016/j.tust.2012.09.004
- [9] Vasilikis D., Karamanos S.A. Mechanics of confined thin-walled cylinders subjected to external pressure. *Appl. Mech. Rev.*, 2014, vol. 66, no. 1, art. 010801. DOI: 10.1115/1.4024165
- [10] Vasil'yev V.V., Moroz N.G. *Kompozitnye ballony davleniya. Proektirovanie, raschet, izgotovlenie i ispytaniya* [Composite pressure cylinders. Designing, calculating, manufacturing and testing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2015.
- [11] Egorov A.V. Buckling of cylindrical shells in rigid medium. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2017, iss. 9 (in Russ.). DOI: 10.18698/2308-6033-2017-9-1670

Egorov A.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Spacecraft and Launch Vehicles, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Egorov V.N. — Dr. Sc. (Eng.), Scientific Director–Academic Secretary of the Institute, Joint Stock Company National Institute of Aviation Technologies (Kirovogradskaya ul. 3, Moscow, 117587 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Egorov A.V., Egorov V.N. Buckling of a heated ring enclosed in a rigid case. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 3, pp. 62–77 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2019-3-62-77



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие автора
Ю.Г. Драгунова

**«Обеспечение прочности и ресурса
реакторных установок с водо-водяными
энергетическими реакторами»**

Изложены подходы к обоснованию безопасности реакторных установок с водо-водяными энергетическими реакторами, в частности прочности оборудования, с учетом нагрузок и изменений свойств материалов в условиях нормальной эксплуатации и при авариях. Рассмотрены вопросы управления ресурсом критических элементов оборудования реакторных установок с водо-водяными энергетическими реакторами. Пособие адресовано студентам специальности «Ядерные реакторы и материалы», может быть полезно для студентов и аспирантов, обучающихся по направлению подготовки «Ядерная энергетика и технологии», а также специалистов, работающих в области создания оборудования для ядерной индустрии.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
<http://baumanpress.ru>